



TITLE:

A study of defect generation phenomena in single crystalline silicon substrate during plasma processing and the characterization techniques(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Nakakubo, Yoshinori

CITATION:

Nakakubo, Yoshinori. A study of defect generation phenomena in single crystalline silicon substrate during plasma processing and the characterization techniques. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19185>

RIGHT:

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	中久保 義則
論文題目	A study of defect generation phenomena in single crystalline silicon substrate during plasma processing and the characterization techniques (プラズマ暴露によるシリコン単結晶基板中の欠陥生成メカニズム及びその評価技術の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術であるプラズマエッチングにおいて、シリコン（Si）基板表面に生じるプラズマ誘起損傷（ダメージ）について、特にイオン入射エネルギーの物理的作用に起因する物理的ダメージに焦点をあて、光学的・電気的手法にもとづくダメージ層の解析と、ダメージ層形成機構の解明、さらにダメージ層除去・回復に関する一連の研究成果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、半導体集積回路デバイスとその製造プロセスにおけるプラズマエッチング技術の概要を述べるとともに、プラズマ・表面相互作用において基板表面に生じるダメージの種類を分類し、種々のダメージのうち本研究が対象とする物理的ダメージについて、その特徴と発現機構について、現在の理解をまとめている。</p> <p>第2章では、本研究で用いるプラズマエッチング装置とダメージ測定法のうち特に、高周波容量結合型・誘導結合型プラズマ装置、光学的手法（分光エリプソメトリー法、フォトリフレクタンス分光法）、ならびに電気的手法（電流－電圧特性測定、静電容量－電圧特性測定）について、それらの動作原理と実験・解析手法をまとめている。</p> <p>第3章では、高周波誘導結合型アルゴン（Ar）プラズマに Si(100) 基板を暴露した際に生じるダメージの基板高周波バイアス依存性を系統的に調べている。具体的には、2種類の周波数（400 kHz, 13.56 MHz）の高周波バイアスを用いることにより、プラズマから基板表面に入射するイオンのエネルギー分布関数を広い範囲にわたり変化させて、ダメージ層の欠陥密度を解析した。これにより、ダメージ層の厚さと基板欠陥密度は、バイアス周波数および複数のバイアス周波数重畳にほとんど依存しないこと、すなわち、プラズマから基板表面に入射するイオンのエネルギー分布にほとんど依存しないこと、一方、プラズマ電位と基板ステージに生じる直流自己バイアス電圧との差、すなわち基板表面に入射するイオンの平均エネルギーに大きく依存することを初めて明らかにした。さらに、これらの結果は、入射イオンの基板中での阻止能と飛程にもとづくプラズマダメージ生成モデルにより説明できることを示した。</p> <p>第4章では、高周波容量結合型・誘導結合型 Ar プラズマ暴露による Si(100) 基板ダメージの基板深さ方向分布を系統的に調べている。具体的には、プラズマ暴露後の基板表面を希フッ酸／過酸化水素混合水溶液を用いたウェットエッチングによりナノスケールで逐次除去し、除去ごとの表面を光学的・電氣的に観察することによりダメージ層における欠陥密度の深さ方向分布を解析した。これにより、ダメージ層の欠陥密度は、平均入射イオンエネルギーのみならず、入射イオンフラックスにも大きく依存すること、具体的には、イオンエネルギーが同じであっても、フラックスの値が小さい場合には、ダメージ層の厚さは同じ程度であるが、局所的な欠陥密度は低く、深さ方向に平均的な欠陥密度も低いことを明らかにした。また、ウェットプロセスによりダメージ層を完全に除去しても、電氣的に欠陥が検出され欠陥が残留していること、</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	中久保 義則
<p>すなわち、入射イオンエネルギー分布の範囲に存在する高エネルギーイオンが基板深く侵入して、基板深いところで欠陥を形成していることを初めて示した。</p> <p>第5章では、上の第4章の手法を駆使して、誘導結合型 Ar/O_2 混合ガスプラズマ暴露による Si 基板ダメージを評価し、実際のプロセスにおいて用いられる酸素 (O_2) 添加のプラズマダメージへの影響を調べている。これにより、Ar/O_2 プラズマでは、Ar プラズマと比較して、ダメージ層の厚さ、欠陥密度、ダメージ層除去後の残留欠陥密度とも低下することを明らかにした。さらに、その要因として、酸素添加によりプラズマ密度が減少し、基板表面に入射するイオンフラックスの値が減少すること、酸素添加によりプラズマ暴露中の基板表面に表面酸化層が形成され、イオンの基板内への侵入が抑制されることを示唆した。</p> <p>第6章では、第4章の手法を駆使して、容量結合型 Ar/H_2 混合ガスプラズマ暴露による Si 基板ダメージを評価し、実際のプロセスにおいて用いられる水素 (H_2) 添加のプラズマダメージへの影響を調べている。Ar/H_2 プラズマでは、Ar プラズマと比較して、ダメージ層の厚さ、欠陥密度、ダメージ層除去後の残留欠陥密度とも増大することを明らかにした。さらに、その要因として、軽い水素イオンあるいは水素原子の基板侵入深さが深いこと、侵入した水素が基板 Si 原子と結合して基板格子欠陥を形成しやすいことを示唆した。また、実際のプロセスにおいて用いられる高温熱処理によるダメージ回復が、基板深くに生じた欠陥除去には有効でなく、熱処理後も欠陥が残留することを示した。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた結果を要約するとともに、プラズマダメージの定量評価に関する今後の研究課題に言及している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

プラズマエッチングは、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術である。本論文は、シリコンエッチングにおいて基板表面に生じるプラズマ誘起損傷(ダメージ)について、特にイオン入射エネルギーの物理的作用に起因する物理的ダメージに焦点をあて、光学的・電気的手法にもとづくダメージ層の解析と、ダメージ層形成機構の解明、さらにダメージ層除去・回復に関する一連の研究成果をまとめたものであり、その主な内容は以下のとおりである。

(1) 光学的手法(分光エリプソメトリー法、フォトリフレクタンス分光法)と電気的手法(電流-電圧特性測定、静電容量-電圧特性測定)を用いて、高周波誘導結合型 Ar プラズマに Si(100) 基板を暴露した際に生じるダメージの基板高周波バイアス依存性を系統的に調べた。これにより、ダメージ層の厚さと基板欠陥密度は、バイアス周波数および複数のバイアス周波数重畳にほとんど依存しないこと、すなわち、プラズマから基板表面に入射するイオンのエネルギー分布にほとんど依存しないこと、一方、プラズマ電位と基板ステージに生じる直流自己バイアス電圧との差、すなわち基板表面に入射するイオンの平均エネルギーに大きく依存することを初めて明らかにした。さらに、これらの結果は、入射イオンの基板中での阻止能と飛程にもとづくプラズマダメージ生成モデルにより説明できることを示した。

(2) 上の光学的・電気的手法と、希フッ酸/過酸化水素混合水溶液を用いたウェットエッチングによるダメージ層の原子層ごと剥離技術を組み合わせて、誘導結合型および容量結合型 Ar プラズマ暴露による Si(100) 基板ダメージ層の欠陥密度の基板深さ方向分布を系統的に調べた。これにより、ダメージ層の欠陥密度は、平均入射イオンエネルギーのみならず、入射イオンフラックスにも大きく依存すること、具体的には、イオンエネルギーが同じであっても、フラックスの値が小さい場合には、ダメージ層の厚さは同じ程度であるが、局所的な欠陥密度は低く、深さ方向に平均的な欠陥密度も低いことを明らかにした。また、ウェットプロセスによりダメージ層を完全に除去しても、電氣的に欠陥が検出され欠陥が残留していること、すなわち、入射イオンエネルギー分布の範囲に存在する高エネルギーイオンが基板深く侵入して、基板深いところで欠陥を形成していることを初めて示した。

(3) さらに、上の(2)の手法を駆使して、Ar/O₂および Ar/H₂ プラズマ暴露による Si(100)基板ダメージを評価し、実際のプロセスにおいて用いられる O₂, H₂ 添加のプラズマダメージへの影響を調べた。これにより、前者では、Ar プラズマと比較して、ダメージ層の厚さ、欠陥密度、ダメージ層除去後の残留欠陥密度とも低下すること、一方、後者では、いずれも増大することを見出し、その物理的・化学的機構について考察した。また、実際のプロセスにおいて用いられる高温熱処理によるダメージ回復が、基板深くに生じた欠陥除去には有効でなく、熱処理後も欠陥が残留することを示した。

以上、要するに、本論文は、プラズマエッチングにおいてシリコン基板表面に生じる物理的ダメージについて、光学的手法と電気的手法を駆使して、ダメージ層の厚さと欠陥密度、および欠陥密度の基板深さ方向分布を系統的に調べ、これら光学的・電気的手法のダメージ定量評価に対する有用性を明らかにするとともに、ダメージ層形成機構を解明し、ダメージ層の除去・回復について考察したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年4月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。